ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ МЕМБРАННО-ЭЖЕКТОРНОЙ СИСТЕМЫ УЛАВЛИВАНИЯ ЛЕГКИХ ФРАКЦИЙ

EVALUATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE COMBINED MEMBRANE-EJECTOR VAPOUR RECOVERY SYSTEM

Е. А. Любин
Evgeniy A. Lyubin

Санкт-Петербургский горный
университет,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russian Federation

К. А. Зайнетдинов
Konstantin A. Zaynetdinov

Санкт-Петербургский горный
университет,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russian Federation

Д. Ю. Белов
Dmitriy Yu. Belov

Санкт-Петербургский горный
университет,
г. Санкт-Петербург,
Российская Федерация

Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russian Federation

На сегодняшний день наиболее распространенным способом сокращения потерь углеводородов от испарения на объектах хранения нефти и нефтепродуктов является использование понтонов и плавающих крыш. Однако системы улавливания легких фракций позволяют добиться большей степени сокращения потерь.

Мембранные системы улавливания легких фракций, широко распространенные в Европе, по-прежнему не находят применения в нашей стране, хотя их эффективность отмечается в некоторых источниках. Другим перспективным способом сокращения потерь являются эжекторные системы улавливания легких фракций.

В работе приводится обоснование применения комбинированных мембранно-эжекторных систем улавливания легких фракций: предложена методика расчета эффективности таких устройств и выполнен анализ влияния различных параметров мембранно-эжекторных установок на степень сокращения потерь бензина при заполнении резервуара.

Currently, the most common way to reduce hydrocarbon losses from evaporation at oil and petroleum products storage facilities is to use pontoons and floating roofs. However, vapour recovery systems can achieve a greater degree of loss reduction.

Membrane vapour recovery units, that are widespread in Europe, are still not in use in Russia, although their high effectiveness is noted in some sources. Another promising way to reduce losses is to use ejector vapour recovery units.

The article substantiates the use of combined membrane-ejector vapour recovery units: a methodology for calculating the effectiveness of such devices is proposed and an analysis of the influence of various parameters of membrane-ejector systems on the degree of reduction of gasoline losses during oil tank filling is made.

Введение

В ходе транспортировки неизбежны потери углеводородов. Основной их объем приходится на потери нефти и нефтепродуктов от испарения, что является серьезной проблемой с экологической и экономической точек зрения.

Применяемые способы рекуперации паров нефтепродуктов либо не обеспечивают требуемого сокращения потерь, либо не являются

универсальными, либо их использование неэкономично.

Системой улавливания легких фракций (УЛФ) называется совокупность технологического оборудования, обеспечивающая отбор и утилизацию легких фракций нефти и нефтепродуктов при повышении давления в газовом пространстве до того, как произойдет их «выдох» в атмосферу.

Ключевые слова

ресурсосберегающие технологии;
потери нефтепродуктов
от испарения; сокращение потерь
углеводородов; система
улавливания легких фракций;
мембранная газоразделительная
установка;
газожидкостной эжектор

Key words

resource-saving technologies;
petroleum products losses from
evaporation; reduction
of hydrocarbons losses;
vapor recovery unit; membrane
gas-separation installation;
gas-liquid ejector

Сравнивая системы УЛФ и традиционные средства сокращения потерь нефти и нефтепродуктов от испарения (понтонные, газоуравнительные системы и т.д.), можно сделать следующий вывод: системы УЛФ обеспечивают большее сокращение потерь, чем традиционные средства, однако их стоимость, как правило, выше.

До сих пор в научном сообществе нет единого мнения об эффективности систем УЛФ. Так, в работе [1] показано, что применение любых систем УЛФ убыточно, а авторы работ [2–4] считают их наиболее перспективными и экономически эффективными. В работе [5] сделан вывод о том, что эжекторные системы УЛФ — одни из самых многообещающих способов сокращения потерь от испарения.

Перспективным может оказаться создание комбинированных систем УЛФ на основе мембранных газоразделительных модулей [6].

Мембранные газоразделительные модули

Сегодня мембранные технологии применяются в самых различных областях промышленности, в том числе в нефтегазовой отрасли. При подготовке природного и попутного нефтяного газов к транспортировке мембранные установки используются для уменьшения содержания сероводорода, углекислого газа и водяного пара [7].

Для разделения большого объема газовой смеси с использованием мембранной технологии в промышленном масштабе требуется большая поверхность мембраны. Для этого изготавливают специальный блок, содержащий мембрану (мембранный модуль), который является основной рабочей частью мембранной установки. Исходная смесь газов (сырьевой поток) подается на вход этой установки и за счет разницы парциальных давлений на внутренней и внешней поверхностях мембраны разделяется в мембранном модуле на ретентат, поток, не пропущенный мембраной, и пермеат, поток, проникший через мембрану.

Половолоконный тип мембранных модулей получил наибольшее распространение за счет возможности обеспечивать высокую плотность упаковки мембраны в мембранном модуле, позволяя увеличивать площадь поверхности разделения газовой смеси и, следовательно, производительность модуля [8].

Газоразделительные свойства половолоконных мембран в первую очередь определяются проницаемостью компонентов газовой

смеси через нее. Мембраны, используемые для газоразделения, должны обладать высокой проницаемостью, одновременно обеспечивая высокую селективность [9].

Мембранные установки могут применяться для разделения паровоздушной смеси (ПВС) из резервуаров. Для этого необходимо сжимать ее при помощи компрессора и пропускать через такую мембранную установку, добиваясь при этом сокращения потерь нефтепродуктов от испарения.

На сегодняшний день мембранные системы УЛФ не считаются эффективным средством сокращения потерь. Исследования показывают, что мембранный способ разделения является убыточным [1], а также не обеспечивает достаточной производительности системы рекуперации паров и не подходит для разделения многокомпонентных газовых смесей [10].

В то же время в странах Европы мембранные системы УЛФ достаточно распространены. Например, немецкая компания BORSIG производит установки для рекуперации на основе мембранных модулей, обеспечивающие высокую эффективность и надежность, а также подходящие для любых газовых смесей, содержащих углеводородные компоненты [11].

Кроме того, в работах [2, 12] отмечается, что применение газоразделительных мембран на АЗС является энергоэффективным решением, позволяющим снизить затраты. Также существуют устройства на основе мембранных модулей, используемые для рекуперации паров нефтепродуктов на АЗС [13] и для улавливания углеводородов ПВС, выбрасываемых при наливке бензина [14].

Необходимо отметить, что в приведенных источниках отсутствуют какие-либо экспериментальные подтверждения полученных результатов или расчеты, связанные с параметрами мембранных модулей. На основе методики расчета разделения двухкомпонентной газовой смеси в мембранном модуле, описанного в работе [15], была предложена математическая модель для описания процесса разделения ПВС в мембранной системе УЛФ [6].

Одним из нерешенных вопросов в работе [6] является проблема использования ретентатного потока, насыщенного углеводородами. Возможным решением данной проблемы может стать создание комбинированной системы УЛФ.

Эжекторные системы УЛФ

В эжекторных системах УЛФ с помощью эжекторов (устройств, в которых происходит передача кинетической энергии от одной среды, движущейся с большей скоростью, к другой) осуществляется компримирование ПВС.

Принцип работы эжектора основан на законе Бернулли. Высоконапорный поток в эжекторе проходит через сопло с маленьким диаметром. Согласно уравнению неразрывности, в сопле происходит увеличение скорости потока, то есть повышается его кинетическая энергия. По закону сохранения энергии это ведет к уменьшению потенциальной энергии потока, то есть к снижению давления во всасывающей камере эжектора. За счет создаваемого разрежения во всасывающую камеру поступает низконапорный поток.

В эжекторных системах УЛФ используются газожидкостные эжекторы (ГЖЭ), в которых высоконапорным потоком является жидкость (нефтепродукт), а низконапорным — ПВС из газового пространства резервуара. При расширении объединенного потока в диффузоре происходит увеличение давления, способствующее

абсорбции паров углеводородов жидким нефтепродуктом.

Эжекторные системы УЛФ получили большое распространение в силу следующих достоинств: простота, надежность, недефицитность комплектующих узлов, отсутствие необходимости в дополнительном персонале для их обслуживания, а также то, что с использованием эжекторных систем степень улавливания паров может быть очень высока [5, 16].

Подключение мембранного газоразделительного модуля перед эжектором сократит объем ПВС, поступающей в эжектор, и соответственно снизит расход необходимого для напорной абсорбции нефтепродукта.

Таким образом, создание комбинированной мембранно-эжекторной системы УЛФ позволит решить некоторые проблемы мембранной и эжекторной технологий разделения ПВС, и поэтому этот вопрос должен быть рассмотрен более детально.

Математическая модель процесса разделения паровоздушной смеси

в мембранном газоразделительном модуле

Упрощенная схема мембранного модуля представлена на рисунке 1.

1 — мембрана; 2 — надмембранное пространство; 3 — дренажный канал;
 $Q_{вх}$, $Q_{вых}$, $Q_{п}$ — объемные расходы соответственно сырьевого, ретентатного и пермеатного потоков; p_x и p_y — давления над мембраной и в дренажном канале;
 x_0 , x_k и y — концентрации компонентов сырьевого, ретентатного и пермеатного потоков
Рисунок 1. Схема мембранного модуля [15]

На производительность мембранного модуля по каждому компоненту газовой смеси, проникающей через мембрану, влияют перепад давлений ΔP и площадь поверхности мембраны S :

$$Q_{pi} = K_i S \Delta P_i, \quad (1)$$

где K_i — коэффициент проницаемости i -ого компонента через мембрану, характеризующий объем i -ого компонента, проходящего за

единицу времени через 1 м² мембраны при единичном перепаде давлений.

Так как мембрана контактирует с газовой смесью, а не с чистыми веществами, то в качестве перепада давлений ΔP принимается разность парциальных давлений. Для i -ого компонента смеси, в соответствии с определением, этот перепад давлений выражается соотношением

$$\Delta P_i = P_x x_i - P_y y_i. \quad (2)$$

Для упрощения будем рассматривать ПВС как смесь двух компонентов: углеводороды — 1 и воздух — 2. Исходя из уравнений (1) и (2) расход компонентов в пермеатном потоке:

$$Q_{\Pi 1} = K_1 S (P_x x - P_y y) = Q_{\Pi} y; \quad (3)$$

$$Q_{\Pi 2} = K_2 S (P_x (1-x) - P_y (1-y)) = Q_{\Pi} (1-y), \quad (4)$$

где x и y — концентрации углеводородов в сырьевом и пермеатном потоках.

Разделив (3) на (4), получим уравнение состояния мембраны [15]:

$$\alpha \frac{x - \phi y}{1 - x - \phi(1-y)} = \frac{y}{1-y}, \quad (5)$$

где $\alpha = K_1/K_2$ — безразмерный коэффициент селективности мембраны; $\phi = P_y/P_x$ — отношение давлений после мембраны и до нее.

Поскольку концентрация до мембраны изменяется от концентрации на входе в мембранный модуль x_0 до концентрации на выходе из него x_k , заменим (данное допущение позволяет существенно повысить точность вычислений [15]) и преобразуем уравнение (5):

$$\alpha \frac{x_0 + x_k - 2\phi y}{2 - x_0 - x_k - 2\phi(1-y)} = \frac{y}{1-y}. \quad (6)$$

Второе уравнение, необходимое для расчета газоразделительного модуля, является следствием равенства расходов паров бензина (приведенных к нормальным условиям):

$$Q_{\text{вх}} x_0 = Q_{\text{вых}} x_k + Q_{\Pi} y. \quad (7)$$

Учитывая, что $Q_{\text{вых}} = Q_{\text{вх}} - Q_{\Pi}$, уравнение может быть преобразовано в зависимость, связывающую концентрации углеводородов x_0 , x_k и y через коэффициент расхода $\theta = Q_{\Pi}/Q_{\text{вх}}$ [15]:

$$x_k - x_0 = \theta(x_k - y). \quad (8)$$

Уравнения (3), (6), (8) образуют систему, решение которой описывает процесс разделения двухкомпонентной смеси в мембранном модуле:

$$\begin{cases} K_1 S (P_x x - P_y y) = Q_{\Pi} y \\ \alpha \frac{x_0 + x_k - 2\phi y}{2 - x_0 - x_k - 2\phi(1-y)} = \frac{y}{1-y} \\ x_k - x_0 = \theta(x_k - y) \end{cases} \quad (9)$$

Потери углеводородов ($\text{м}^3/\text{ч}$) с пермеатным потоком после разделения ПВС в мембранном модуле вычисляются по формуле:

$$L_1 = Q_{\Pi} y. \quad (10)$$

Математическая модель разделения паровоздушной смеси

в жидкостно-газовом эжекторе

Фазовые переходы, происходящие в жидкостно-газовом эжекторе, описываются уравнением фазовых концентраций [16, 17]:

$$\sum_{i=1}^r \frac{Z_{cmi} \cdot (1 - K_i)}{1 - \varepsilon \cdot (1 - K_i)} = 0, \quad (11)$$

где ε — мольная доля газовой фазы в смеси в условиях фазового равновесия;

Z_{cmi} — мольная доля i -ого компонента в исходной смеси;

K_i — константа фазового равновесия i -ого компонента;

r — число компонентов в смеси.

Для определения констант фазового равновесия при заданных давлении P и температуре T можно воспользоваться формулой:

$$K_i = a_0 \cdot \left(\frac{T}{273} \right)^{a_1} \cdot \left(\frac{P}{P_{ам}} \right)^{a_2}. \quad (12)$$

Числовые коэффициенты a_0 , a_1 и a_2 в формуле (12) являются постоянными величинами для каждого компонента смеси.

Концентрации каждого компонента в жидкой и газовой фазах (в мольных долях) определяются исходя из следующих соотношений:

$$C_{жci} = \frac{Z_{cmi}}{1 - \varepsilon \cdot (1 - K_i)}; \quad (13)$$

$$C_{ci} = \frac{Z_{cmi} \cdot K_i}{1 - \varepsilon \cdot (1 - K_i)} = C_{жci} \cdot K_i. \quad (14)$$

Для определения мольной концентрации компонентов в смеси Z_{cmi} необходимо выполнить расчет состава смеси. Исходными данными для расчета являются объемные доли x_i компонентов ПВС, поступающей в эжектор. Массовые доли компонентов исходной смеси определяются по формуле:

$$q_i = \frac{m_i}{\sum m_i}, \quad (15)$$

где m_i — массовые расходы отдельных компонентов исходной ПВС при атмосферном давлении и температуре окружающей среды, определяемые из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$m_i = \frac{P \cdot x_i \cdot Q_{ПВС} \cdot M_i}{\bar{R} \cdot T}. \quad (16)$$

В формуле (16) M_i — молярная масса i -ого компонента. Молярная масса смеси ПВС и дизельного топлива определяется по формуле

$$M_{см} = \frac{m_{дт} + \sum m_i}{\frac{m_{дт}}{M_{дт}} + \sum \frac{m_i}{M_i}}, \quad (17)$$

где $M_{дт}$ — молярная масса дизельного топлива; $m_{дт}$ — массовый расход дизельного топлива, который определяется в зависимости от расхода ПВС, плотности дизельного топлива $\rho_{дт}$ и коэффициента эжекции $U = Q_{дт}/Q_{ПВС}$, характеризующего соотношение смешивающихся дизельного топлива и ПВС:

$$m_{дт} = Q_{дт} \cdot \rho_{дт} = U \cdot Q_{ПВС} \cdot \rho_{дт}. \quad (18)$$

Массовая концентрация i -ого компонента в полученной смеси ПВС и дизельного топлива:

$$q_{смi} = \frac{q_{жi} \cdot m_{дт} + q_{гi} \cdot \sum m_i}{m_{дт} + \sum m_i}, \quad (19)$$

где $q_{жi}$ и $q_{гi}$ — массовые концентрации i -ого компонента соответственно в жидкой и газовой фазах. Тогда искомая молярная концентрация компонентов в смеси

$$Z_{смi} = q_{смi} \cdot \frac{M_{см}}{M_i}. \quad (20)$$

Объем газа, приходящийся на 1 м³ жидкой фазы при условиях фазового перехода, вычисляется по формуле [17]:

$$\delta_r = \frac{M_r \cdot \rho_{ж} \cdot \varepsilon}{M_{ж} \cdot \rho_r \cdot (1 - \varepsilon)}, \quad (21)$$

где M_r , $M_{ж}$, ρ_r , $\rho_{ж}$ — молярные массы и плотности газовой и жидкой фаз, являющиеся аддитивными величинами и определяемые по формулам:

$$M = \sum M_i \cdot C_i; \quad (22)$$

$$\rho = \sum \rho_i \cdot C_i. \quad (23)$$

Объем углеводородов, выделяющийся из полученной после абсорбции в эжекторе смеси за единицу времени, определяет потери углеводородов в эжекторе. Данную величину определим по формуле:

$$L_2 = C_{ув} \cdot Q_2 = C_{ув} \cdot \delta_r \cdot U \cdot Q_{ПВС}, \quad (24)$$

где $C_{ув}$ — сумма концентраций углеводородных компонентов, присутствующих в газовой фазе, рассчитанных по формуле (14); Q_2 — объемный расход газовой фазы.

Эффективность сокращения потерь при использовании мембранно-эжекторной системы УЛФ определяется по формуле:

$$S = \left(1 - \frac{L_1 + L_2}{C_{ср.зак} \cdot Q_{зак}} \right) \cdot 100\%, \quad (25)$$

а при отсутствии газоразделительного мембранного модуля (эффективность эжекторной системы УЛФ) принимается $L_1=0$.

Результаты расчета эффективности мембранно-эжекторной системы УЛФ

Для определения средней концентрации углеводородов в ПВС за время заполнения резервуара использована методика расчета потерь нефтепродуктов от «больших дыханий» [17]. Для типового резервуара РВС 5000, который заполняется бензином с плотностью 740 кг/м³, вязкостью 0,9 сСт и молярной массой его паров 62 кг/кмоль с уровня взлива 2 м до уровня 10 м при температуре 20 °С с расходом 400 м³/ч через приемо-раздаточный патрубков диаметром 360 мм при начальной концентрации углеводородов в ПВС $C_0=0,2$, средняя концентрация паров бензина составила 0,35. Следовательно, концентрация углеводородов на входе в мембранную установку $x_0=0,35$.

Расход ПВС на входе в мембранный газоразделительный модуль примем равным расходу закачки бензина в резервуар: $Q_{вх} \approx Q_{зак} = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Считая, что дренажный канал мембранного модуля соединен с атмосферой, примем давление в дренажном канале $P_y \approx 1 \text{ атм}$.

Коэффициенты в уравнении (12) определим по данным, приведенным в [17]. Поскольку данные о компонентном составе ПВС отсутствуют, продолжим считать паровоздушную смесь двухкомпонентной. Пары углеводородов в ПВС по своей молярной массе наиболее близки к бутану и его изомерам. Содержащиеся в воздухе преимущественно азот и кислород абсорбируются дизельным топливом практически одинаково плохо, поэтому будем считать, что $K_{N_2} \approx K_{O_2} \approx K_{возд}$ [16]. Так как остаток «гексан плюс высшие» практически невозможно разделить хроматографическими методами, примем константу фазового равновесия дизельного топлива равной константе равновесия остатка.

В связи с отсутствием конкретных данных по параметрам мембранных газоразделительных модулей, а также по характеристикам существующих эжекторов было принято решение в данной работе рассмотреть, как изменяется эффективность сокращения потерь при использовании систем УЛФ при изменении этих величин, и сделать выводы по результатам этих расчетов.

Коэффициент проницаемости мембраны по углеводородам $K_L S$ (параметр, показывающий, какой объем (м^3) паров бензина проходит через мембрану за единицу времени (ч) при перепаде давления в $0,1 \text{ МПа}$), коэффициент селективности мембраны α (или обратная ему величина $1/\alpha$, имеющая тот же смысл, но более удобная для расчетов), давление в надмем-

бранном пространстве P_x , коэффициент эжекции U (или обратная ему величина $1/U$, имеющая тот же смысл, но более удобная для расчетов) и давление в эжекторе P будут поочередно изменяться относительно некоторых «средних» значений, представленных в таблице 1.

Таблица 1. «Средние» значения изменяемых параметров

Параметр	$K_L S, \text{м}^3/(\text{ч} \cdot \text{атм})$	$1/\alpha$	$P_x, \text{атм}$	$1/U$	$P, \text{атм}$
Значение	5	8	8	8	4

В результате вычислений по формулам, составляющим описанную в данной работе математическую модель процесса разделения ПВС в мембранном модуле и в эжекторе, был получен массив данных, описывающих изменение эффективности систем УЛФ в зависимости от исходных параметров.

Ниже представлены графики (рисунки 2–6), построенные по полученным расчетным данным. В расчетах учитывалось, что эффективность работы эжектора будет снижаться, если одно и то же дизельное топливо используется для абсорбции паров бензина несколько раз. Значения эффективности на графиках представлены для нескольких циклов использования дизельного топлива ($n = 1, 2, 3, 5, 7, 10$).

Важной характеристикой работы эжекторной системы УЛФ также является расход не-

обходимого дизельного топлива. В представленной математической модели эта величина связана через коэффициент эжекции с расходом ПВС на входе в эжектор, следовательно, на нее влияют изменения параметров мембранного модуля и коэффициента эжекции. Графики расхода дизельного топлива, значения которого откладываются по дополнительной вертикальной оси, также представлены на рисунках ниже.

На рисунке 2 представлены графики зависимости эффективности сокращения потерь при использовании мембранно-эжекторной системы УЛФ и расхода дизельного топлива в эжекторе от давления в надмембранном пространстве P_x .

Рисунок 2. Эффективность сокращения потерь в зависимости от давления в надмембранном пространстве

Как видно из рисунка 2, увеличение давления в надмембранном пространстве влияет на концентрации углеводородов и на расходы в пермеатном и ретентатном потоках таким образом, что эффективность сокращения потерь, обеспечиваемая системой УЛФ, снижается, но в то же время снижается необходимый для разделения ПВС в эжекторе расход дизельного топлива.

На рисунке 3 представлены графики зависимости эффективности сокращения потерь при использовании мембранно-эжекторной системы УЛФ и расхода дизельного топлива в эжекторе от проницаемости мембранного модуля по углеводородам K_1S .

Рисунок 3. Эффективность сокращения потерь в зависимости от проницаемости мембранного модуля

сти сокращения потерь, однако это снижение не существенно, а с увеличением числа циклов использования дизельного топлива эффективность сокращения потерь практически не зависит от селективности мембраны. При этом расход дизельного топлива при увеличении селективности мембраны заметно снижается.

На рисунке 5 представлены графики зависимости эффективности сокращения потерь при использовании мембранно-эжекторной системы УЛФ и эжекторной системы УЛФ (без подключения мембранного модуля), а также расхода дизельного топлива в эжекторе в обоих случаях от коэффициента эжекции.

Графики на рисунке 3 в целом аналогичны графикам на рисунке 2: увеличение проницаемости мембранного модуля ведет к снижению эффективности сокращения потерь, но необходимый для разделения ПВС в эжекторе расход дизельного топлива также снижается.

На рисунке 4 представлены графики зависимости эффективности сокращения потерь при использовании мембранно-эжекторной системы УЛФ и расхода дизельного топлива в эжекторе от коэффициента селективности мембраны.

Из графиков на рисунке 4 видно, что повышение селективности мембраны в мембранном модуле вызывает снижение эффективно-

Графики на рисунке 5 показывают, что эффективность сокращения потерь при подключении мембранного модуля существенно снижается по сравнению с использованием обычной эжекторной системы УЛФ, но и необходимый расход дизельного топлива уменьшается более чем в 1,5 раза. Увеличение коэффициента эжекции в обоих случаях позволяет экономить расходуемое дизельное топливо, однако при этом снижается эффективность системы УЛФ.

На рисунке 6 представлены графики зависимости эффективности сокращения потерь при использовании мембранно-эжекторной системы УЛФ и эжекторной системы УЛФ от

Рисунок 4. Эффективность сокращения потерь в зависимости от селективности мембранного модуля

Рисунок 5. Эффективность сокращения потерь в зависимости от коэффициента эжекции

давления, при котором происходит напорная абсорбция в эжекторе. Расход дизельного топлива при изменении давления считается по-

стоянной величиной, равной $29,7 \text{ м}^3/\text{ч}$ при подключении мембранного модуля и $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ при его отсутствии.

Рисунок 6. Эффективность сокращения потерь в зависимости от давления, создаваемого в эжекторе

Из рисунка 6 можно заключить, что эффективность сокращения потерь в зависимости от давления в эжекторе увеличивается по гиперболическому закону, причем чем больше давление, тем меньше различия между значениями эффективности на разных циклах использования дизельного топлива. Следовательно, повышение давления в эжекторе позволяет использовать один и тот же низколетучий нефтепродукт несколько раз без существенного снижения эффективности сокращения потерь.

Выводы

Результаты проведенных расчетов и построенные по полученным данным графики позволяют сделать следующий вывод: использование эжекторной системы УЛФ позволяет добиться значительной степени улавливания

паров бензина. Подключение перед ГЖЭ мембранной установки снижает эффективность сокращения потерь, однако позволяет сократить расход необходимого для напорной абсорбции дизельного топлива.

Таким образом, решение об использовании той или иной системы УЛФ должно проводиться индивидуально для каждого объекта. Если на нефтебазе производится хранение дизельного топлива или керосина, то установка эжекторной системы УЛФ позволит существенно снизить потери легкоиспаряющихся нефтепродуктов. Если же отсутствует возможность обеспечить эжекторную систему УЛФ необходимыми объемами низколетучего нефтепродукта, целесообразно подключение мембранной установки и использование мембранно-эжекторной системы УЛФ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Беккер А.В., Николайчук С.Н. Выбор оптимальных технических решений для улавливания углеводородных паров от резервуарных парков нефти // Проблемы геологии и освоения недр: тр. XX Междунар. симпозиума имени академика М.А. Усова студентов и молодых ученых, посвященного 120-летию со дня основания Томского политехнического университета. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2016. С. 458–459.
2. Варнакова Е.А. Перспективные способы снижения потерь нефтепродуктов на АЗС и оценка ущерба от выбросов паров нефтепродуктов в атмосферу // Международный технико-экономический журнал. 2013. № 3. С. 99–103.
3. Кузнецов Е.В. Методы сокращения потерь светлых нефтепродуктов при проведении технологических операций на нефтебазах // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № S10. С. 316–322.
4. Алмаханова Э.А., Жаманбаев Б.У. Потери светлых нефтепродуктов при перевозке, хранении и сливно-наливных операциях // Механика и технологии. 2013. № 3. С. 6–18.
5. Коршак А.А. Ресурсо- и энергосбережение при транспортировке и хранении углеводородов. Ростов-на-Дону: Феникс, 2016. 411 с.
6. Зайнетдинов К.А., Любин Е.А. Система улавливания легких фракций с применением мембранных модулей для сокращения потерь нефтепродуктов от испарения // Нефтегазовое дело. 2018. Т. 16. № 5. С. 81–88. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-5-81-88.
7. Мембранное разделение газов // НПК Грасис. URL: <http://www.grasys.ru/tehnologii/membrannoe-razdelenie-gazov/> (дата обращения: 13.04.2020).
8. Бекман И.Н. Мембраны в медицине. Курс лекций. М.: МГУ, 2009. URL: <http://profbeckman.narod.ru/MedMemb.htm> (дата обращения: 13.04.2020).
9. Половолоконные газоразделительные мембраны // НПК Промтегра. URL: <https://www.promtegra.ru/tehnologii/polovolokonnye-gazorazdelitelnye-membrany> (дата обращения: 13.04.2020).
10. Варнаков В.В., Марцев Ю.П. Сокращение потерь топлива при хранении // Международный научный журнал. 2008. № 1. С. 75–80.
11. BORSIG Vapour Recovery Unit // BORSIG Membrane Technology GmbH. URL: <https://www.borsig.de/en/products-and-services/membrane-technology-for-emission-control/vapour-recovery-units/> (дата обращения: 14.04.2020).
12. Варнакова Е.А. Совершенствование технологии заправки автотранспортных средств: дис. ... канд. техн. наук. М.: РГАУ, 2016. 175 с.
13. Пат. 157866 РФ, МПК В 60 К 15/035. Устройство улавливания паров нефтепродуктов на АЗС с разделением паровоздушной смеси на мембранах / Д.В. Варнаков, В.В. Варнаков, А.В. Платонов, Е.А. Варнакова. 2015111163/11, Заявлено 27.03.2015; Оpubл. 20.12.2015. Бюл. 35.
14. Пат. 2287096 РФ, МПК F 04 F 5/54. Способ работы насосно-эжекторной установки в системе очистки от углеводородов парогазовой среды, образующейся при хранении бензина или при заполнении им емкости / В.Г. Цегельский. 2005112317/06, Заявлено 25.04.2005; Оpubл. 10.11.2006. Бюл. 31.
15. Бондаренко В.Л., Лосяков Н.П., Симоненко Ю.М., Чулкин А.П., Кузьменко И.Ф., Талакин О.Г. Мембранное разделение газовых смесей на основе компонентов воздуха // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. 2012. № 5 (5). URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/crigen/180.html> (дата обращения: 14.04.2020). DOI: 10.18698/2308-6033-2012-5-180.
16. Любин Е.А. Обоснование технологии улавливания паров нефти из резервуаров типа РВС с использованием насосно-эжекторной установки: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: СПбГТИ им. Г.В. Плеханова, 2010. 185 с.
17. Тугунов П.И., Новоселов В.Ф., Коршак А.А., Шаммазов А.М. Типовые расчеты при проектировании и эксплуатации нефтебаз и нефтепроводов. Уфа: ДизайнПолиграфСервис, 2002. 658 с.

REFERENCES

1. Bekker A.V., Nikolaichuk S.N. Vybor optimal'nykh tekhnicheskikh reshenii dlya ulavlivaniya uglevodorodnykh parov ot rezervuarnykh parkov nefti [Selection of Optimal Technical Solutions for Capturing Hydrocarbon Vapors from Oil Tank Farms]. *Trudy XX Mezhdunarodnogo simpoziuma imeni akademika M.A. Usova studentov i molodykh uchennykh, posvyashchennogo 120-letiyu so dnya osnovaniya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta «Problemy geologii i osvoeniya nedr»* [Proceedings of the XX International Academician M.A. Usov Students and Young Scientists Dedicated to the 120th Anniversary of the Foundation of the Tomsk Polytechnic University «Problems of Geology and Subsoil Development»]. Tomsk, Natsional'nyi issledovatel'skii Tomskii politekhnicheskii universitet Publ., 2016, pp. 458–459. [in Russian].
2. Varnakova E.A. Perspektivnye sposoby snizheniya poter' nefteproduktov na AZS i otsenka ushcherba ot vybrosov parov nefteproduktov v atmosferu [Promising Methods of Oil Losses Reduction at the Gas Stations and Evaluation of the Damage of Oil Vapor Emissions into the Atmosphere]. *Mezhdunarodnyi tekhniko-ekonomicheskii zhurnal — The International Technical-Economic Journal*, 2013, No. 3, pp. 99–103. [in Russian].
3. Kuznetsov E.V. Metody sokrashcheniya poter' svetlykh nefteproduktov pri provedenii tekhnologicheskikh operatsii na neftebazakh [Methods to Reduce the Loss of Light Oil Products During Technological Operations at Oil Depots]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' — Mining Informational and Analytical Bulletin*, 2008, No. S10, pp. 316–322. [in Russian].
4. Almakhanova E.A., Zhamanbaev B.U. Poteri svetlykh nefteproduktov pri perevozke, khranении i slivonativnykh operatsiyakh [Loss Light Petroleum Products at Transportation, Storage and Plum-Loading Operations]. *Mekhanika i tekhnologii — Mechanics and Technologies*, 2013, No. 3, pp. 6–18. [in Russian].
5. Korshak A.A. Resurso- i energosberezhenie pri transportirovke i khranении uglevodorodov [Resource and Energy Saving during Transportation and Storage of Hydrocarbons]. Rostov-on-Don, Feniks Publ., 2016. 411 p. [in Russian].
6. Zainetdinov K.A., Lyubin E.A. Sistema ulavlivaniya legkikh fraktsii s primeneniem membrannykh modulei dlya

sokrashcheniya poter' nefteproduktov ot ispareniya [Vapor Recovery System Based on Membrane Modules for Reduction of Oil Products Evaporation Losses]. *Neftgazovoe delo — Petroleum Engineering*, 2018, Vol. 16, No. 5, pp. 81–88. DOI: 10.17122/ngdelo-2018-5-81-88. [in Russian].

7. *Membrannoe razdelenie gazov* [Membrane Gas Separation]. NPK Grasis. Available at: <http://www.grasis.ru/tehnologii/membrannoe-razdelenie-gazov/> (accessed 13.04.2020). [in Russian].

8. Bekman I.N. *Membrany v meditsine. Kurs lektsii* [Membranes in Medicine. Lecture Course]. Moscow, MGU Publ., 2009. Available at: <http://profbeckman.narod.ru/MedMemb.htm> (accessed 13.04.2020). [in Russian].

9. *PolovoloKonnye gazorazdelitel'nye membrany* [Hollow Fiber Gas Separation Membranes]. NPK Promtegra. Available at: <https://www.promtegra.ru/tehnologii/polovoloKonnye-gazorazdelitel'nye-membrany> (accessed 13.04.2020). [in Russian].

10. Varnakov V.V., Martsev Yu.P. Sokrashchenie poter' topliva pri khraneniі [The Fuel Losses Reduction during Storage]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal — The International Scientific Journal*, 2008, No. 1, pp. 75-80. [in Russian].

11. BORSIG Vapour Recovery Unit. BORSIG Membrane Technology GmbH. Available at: <https://www.borsig.de/en/products-and-services/membrane-technology-for-emission-control/vapour-recovery-units/> (accessed 14.04.2020).

12. Varnakova E.A. Sovershenstvovanie tekhnologii zapravki avtotransportnykh sredstv: dis. kand. tekhn. nauk [Improving the Technology of Refueling Vehicles: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Moscow, RGAU Publ., 2016. 175 p. [in Russian].

13. Varnakov D.V., Varnakov V.V., Platonov A.V., Varnakova E.A. Ustroistvo ulavlivaniya parov nefteproduktov

na AZS s razdeleniem parovozdushnoi smesi na membranakh [A Device for Collecting Oil Vapor at a Gas Station with Separation of the Air-Vapor Mixture on the Membranes]. Patent RF, No. 157866, 2015. [in Russian].

14. Tsegelskii V.G. *Sposob raboty nasosno-ezhektornoі ustanovki v sisteme ochistki ot uglevodorodov parogazovoi sredy, obrazuyushcheysya pri khraneniі benzina ili pri zapolnenii im emkosti* [Method for Operation of Pump-Ejector Plant in System for Cleaning Hydrocarbons from Steam-Gas Substance, Forming during Storage of Petrol or when a Vessel is Filled with It]. Patent RF, No. 2287096, 2006. [in Russian].

15. Bondarenko V.L., Losyakov N.P., Simonenko Yu.M., Chuklin A.P., Kuzmenko I.F., Talakin O.G. Membrannoe razdelenie gazovykh smesei na osnove komponentov vozdukhа [Membrane Separation of Gas Mixtures Based on Air Components]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana — Herald of the Bauman Moscow State Technical University*, 2012, No. 5 (5), Available at: <http://engjournal.ru/catalog/machin/crigen/180.html> (accessed 14.04.2020). DOI: 10.18698/2308-6033-2012-5-180. [in Russian].

16. Lyubin E.A. Obosnovanie tekhnologii ulavlivaniya parov nefti iz rezervuarov tipа RVS s ispol'zovaniem nasosno-ezhektornoі ustanovki: dis. kand. tekhn. nauk [Justification of the Technology for Trapping Oil Vapor from Reservoirs of the RVS Type Using a Pump-Ejector Installation: Cand. Engin. Sci. Diss.]. Saint-Petersburg, SPbGGI im. G.V. Plekhanova Publ., 2010. 185 p. [in Russian].

17. Tugunov P.I., Novoselov V.F., Korshak A.A., Shammazov A.M. *Tipovye raschety pri proektirovaniі i ekspluatatsii neftebaz i nefteprovodov* [Typical Calculations in the Design and Operation of Oil Depots and Oil Pipelines]. Ufa, DizainPoligrafServis Publ., 2002. 658 p. [in Russian].

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ABOUT THE AUTHORS

Любин Евгений Анатольевич, канд. техн. наук, доцент кафедры транспорта и хранения нефти и газа, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Evgeniy A. Lyubin, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of the Department of Oil and Gas Transportation and Storage, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation

Зайнетдинов Константин Артурович, студент кафедры транспорта и хранения нефти и газа, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Konstantin A. Zaynetdinov, Student of the Department of Oil and Gas Transportation and Storage, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation

Белов Дмитрий Юрьевич, студент кафедры транспорта и хранения нефти и газа, Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

Dmitriy Y. Belov, student of the Department of Oil and Gas Transportation and Storage, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russian Federation

e-mail: s182229@stud.spmi.ru